

Параксиальные характеристики этой схемы представлены в таблице 1,

Таблица 1. Параксиальные характеристики

f	f'	S_F	S'_F	S_H	S'_H
-	-	-	-	1,59	1,59

где f - переднее фокусное расстояние; f' - заднее фокусное расстояние; S_F - передний фокальный отрезок; S'_F - задний фокальный отрезок; S_H , S'_H - положение главных плоскостей.

Результаты абберационного расчета 3-го порядка оптической системы прицела в центрированном варианте, сведены в таблицу 2.

По графикам аббераций установлено, что объектив удовлетворяет допустимым требованиям для такого типа прицелов.

Таблица 2. Суммы и абберации Зейделя

$S1$	$S2$	$S3$	$S4$	$S5$	$S1_{xp}$	$S2_{xp}$
0,304	0,466	0,715	0,389	1,693	-0,006	0,015
-0,226	-0,104	-0,047	0,904	0,394	0	0
-0,002	-0,031	-0,486	0,389	-1,499	-0,0004	0,001
0,076	0,331	0,180	1,684	0,588	-0,006	0,016

1. Коллиматорные прицелы - все о коллиматорах, 2015. – <http://optical-devices.ru/pages/kollimatorye-pricely-vse-o-kollimatorah.html>
2. Коллиматорные прицелы: принцип работы, устройство и типы, 2010. – <http://www.profoptic.ru/articles/id=55>.

УДК 535.317

ДВУХЗЕРКАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЗАФОКАЛЬНОГО ТИПА

Артюхина Н.К., Самбрано Л.Ф., Власовец Н.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Зеркальные системы приобрели широкое распространение в оптической отрасли в настоящее время в связи с расширением спектрального диапазона работы оптической аппаратуры. В них отсутствуют хроматические абберации для любых значений оптических характеристик. Существующие схемы из двух зеркал имеют несложную конструкцию; их можно разделить на два типа: предфокальные и зафокальные [1].

В работе проводится исследование двухзеркальных систем зафокального типа. Предполагается апланатическая коррекция [2]. Оптические схемы базовых схем представлены на рисунке 1 (второе зеркало имеет центральное отверстие для прохождения светового пучка лучей). Представлены объективы, в которых лучи претерпевают по одному отражению от каждого из зеркал.

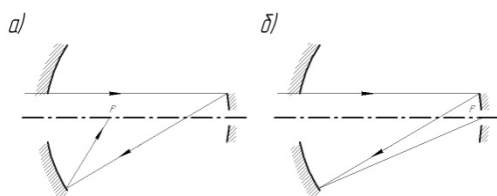


Рис. 1. Схемные решения зафокальных объективов с малым главным и большим вторичным зеркалами

Рассмотренные зафокальные объективы состоят из двух вогнутых зеркал и имеют промежуточное изображение. Кома и сферическая абберация откорректированы за счет придания асферической формы поверхностям зеркал.

Для расчета и анализа аббераций выбраны базовые схемы (рисунок 1). Из пяти известных методов (метод проб, алгебраический, комбинированный, метод автоматической оптимизации и композиционный) в работе применен алгебраический метод, как наиболее подходящий при осуществлении абберационного расчета.

В частности, зафокальный объектив имеет следующие условия нормировки для первого параксиального луча:

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 < 0, \alpha_3 = -1, h_1 = 1,0, h_2 < -1.$$

Методика расчета аббераций осуществлялась в два этапа.

На первом этапе, который называется «габаритный расчет», получены значения конструктивных параметров (радиусы кривизны, высота параксиального луча и расстояние между поверхностями). Значение свободного коррекционного параметра α_2 , влияющего на конструктивное решение системы, имеет пять практических значений:

$$\alpha_2 > -1; \quad \alpha_2 = -1; \quad -1,618034 < \alpha_2 < -1; \\ \alpha_2 = -1,618034; \quad \alpha_2 < -1,618034.$$

На втором этапе – этапе коррекции aberrаций, использована система следующих уравнений, описывающих исправление сферической aberrации и комы:

$$B_0 = \frac{1}{2} \sum_{z=1}^{z=2} h_z Q_z = 0$$

$$K_0 = -\frac{1}{2} \sum_{z=1}^{z=2} W_z + \frac{1}{2} \sum_{z=1}^{z=2} h_z Q_z S_z = 0$$

Таким образом, произведена апланатическая коррекция монохроматических aberrаций третьего порядка. Коррекционными параметрами aberrаций третьего порядка в данном случае являются деформации каждой асферической поверхности. Значения деформаций $\sigma_s = -e^2$ определены квадратом эксцентриситета меридиональных кривых второго порядка зеркальных поверхностей.

Получены конструктивные параметры двух-зеркального зафокального объектива и значения деформаций, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Конструктивные параметры зафокальных объективов (в относительных величинах)

№ п/п	α_2	$r_1 = -r_2$	h_2
1	-1,000	-2,0000	-2,0000
2	-1,618034	-1,236	-1,618034
№ п/п	d	σ_1	σ_2
1	-3,0000	0,33300	-0,08333
2	-1,618034	-0,52786	-0,12461

Для проведения более тщательного анализа aberrаций необходимо было найти aberrационные характеристики; результаты aberrационного расчета зафокальной системы, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Aberrационные характеристики (компьютерные расчеты в ППП Oral)

m	Точка на оси			
	$\Delta S'$, мм	$\Delta Y'$, мм	η , %	2ω
0,707	-0,0112	-0,00225	0,0190	2°
1,0	0,00797	-0,01123	0,0819	4°
Точка вне оси ($2\omega=4^\circ$)				
0,707	Z'_m , мм	Z'_s , мм	$\Delta Y'$, %	
1,0	-0,0073	0,1292	0,0189	

где $\Delta S'$, $\Delta Y'$ - соответственно продольная и поперечная сферическая aberrация, η , % – неизопланатизм, Z'_m , Z'_s - астigmatические отрезки.

Чтобы оценить производственную адаптацию базовых схем, была проведена оценка величин технологических параметров, которые показаны в таблице 3 и 4.

Таблица 3. Технологические параметры асферических поверхностей

Меридиональное уравнение асферических поверхностей	Высота Y, мм	Световой диаметр, мм
$y^2 = -247,2x - 0,72x^2$	38,460	76,92
$y^2 = 247,2x - 0,98x^2$	65,959	131,917

Таблица 4. Расчет профиля асферики первой поверхности

№	Профиль поверхности		
	Y (мм)	Z (мм)	
1	.000000	.000000	
2	.769200	-.002393	
3	1,538400	-.009574	
4	3,076800	-.038299	
5	4,615200	-.086180	
6	5,384400	-.117307	
7	6,153600	-.153228	
8	7,692000	-.239458	
9	8,461200	-.289772	
10	10,768800	-.469543	
№	Отклонение от сферы (мм)		
	Параксиальной $R_0=-123.6$	Ближайшей 1 $R=-124.77868$	Ближайшей 2 $R=-124.73415$
1	.000000	.000000	.019306
2	.000000	-.000031	.019276
3	.000000	-.000122	.019184
4	.000001	-.000274	.019032
5	.000003	-.000486	.018820
6	.000008	-.000756	.018550
7	.000016	-.001084	.018222
8	.000029	-.001468	.017838
9	.000050	-.001906	.017400
10	.000080	-.002396	.016910
11	.000122	-.002936	.016370
12	.000179	-.003522	.015784
13	.000254	-.004152	.015154
14	.000350	-.004822	.014484
15	.000471	-.005529	.013777

Расчет профиля асферики второй поверхности был выполнен аналогично.

Кроме вышеприведенных расчетов оценка производственной адаптации базовой модели к промышленному использованию была выполнена с учетом определения пределов допусков на конструктивные и технологические параметры, а также установлена возможность защиты поверхности приемника изображения от постороннего света и различных бликов.

С целью улучшения оптических характеристик базовой системы проведена оптимизация в программной среде Zemax. При проведении оптимизации базовой системы получены значения деформаций для первой поверхности $\sigma_1 = -0.401$, т.е. уменьшение на 24% , а для второй поверхности $\sigma_2 = -0.074$, (коническая постоянная)

ная уменьшена на 41%). Радиусы кривизны и осевое расстояние между поверхностями, а также парааксиальные характеристики (фокусное расстояние, передний и задний отрезки) остались неизменными.

Таким образом, зафокальные системы с малым главным и большим вторичным зеркалами и равными по абсолютной величине радиусами являются светосильными и способны развивать значительные поля зрения. Они обеспечивают удовлетворительное качество изображения при относительных отверстиях до 1:1,2 и полях зрения до 4°. Возможны варианты модулей, обеспечивающих удобное положение

плоскости изображения. В зафокальных двухзеркальных системах данного типа экранирование определяется размером приемника излучения и блендой-экраном, необходимым для за-

щиты приемника излучения от прямой засветки. Рассчитанная система технологически адаптирована. В зафокальном объективе зеркала имеют эллипсоидную форму, но асферичность зеркальных поверхностей не превышает 0,01мм, что соответствует технологическим стандартам.

Результаты расчетов и полученные формулы могут быть использованы при проектировании новых зеркальных систем с повышенными оптическими характеристиками.

1. Максудов, Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики / Д.Д. Максудов. – М.: Наука, 1984. – 276 с.
2. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н.К. Артюхина, БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.

УДК 620.179.1+534.1

ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ ПО ОБЪЕКТУ С НЕОДНОРОДНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

Баев А.Р., Левкович Н.В., Коновалов Г.Е., Асадчая М.В., Стойчева И.В.

Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

На промышленных предприятиях нашей республики и за рубежом упрочнение поверхности металлоизделий производится различными способами обработки, включая термические, химико-термические, а также механические способы. В подавляющем большинстве случаев контроль этой важной операции осуществляется разрушающим методом – по данным зависимости твердости от глубины упрочняемого слоя $B(z)$ либо изменения бальности зерна. Такой подход не дает полного представления о качестве контролируемой выборочно партии производимой продукции. В работе проведен анализ известных в мире разработок по контролю качества упрочнения металлоизделий магнитными, электромагнитными, акустическими методами в США, Франции, Германии, а также в странах СНГ и Республики Беларусь. Применение предлагаемых методов и средств имеет существенные ограничения, обусловленные требованиями к составу металла, геометрии и габаритам объекта, диапазону измеряемых толщин упрочненного слоя h , локальности и точности измерений, а также их трудоемкости и производительности.

Использование именно ультразвукового контроля для решения указанной проблемы обусловлено наличием наиболее высокой степени корреляции между твердостью B и скоростью

моды упругой волны, которая может быть представлена в обобщенном виде:

$$C = \Theta(\mu^*) (E^*/\rho^*)^{0,5} = \Theta(\mu^*) c^*,$$

где E^* , ρ^* и μ^* – некоторые эффективные параметры: модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность материала соответственно; $\Theta(\mu^*)$ – некоторая функция, от вида которой зависит определяемая мода (продольная, поперечная и поверхностная); c^* соответствует скорости нулевой моды стержневой волны. Отметим, что по отношению к свойствам слоя $\Xi_{A,i} \in \{E, \rho, \mu\}$ упрочненный поверхностный слой (УПС) большого числа объектов можно считать слабонеоднородным, т.к.

$$\varepsilon_A = \Delta \Xi_{A,i} / \Xi_{A,i} = \{\Delta C/C, \Delta \mu/\mu, \Delta E/E, \Delta \rho/\rho\} \ll 1,$$

где $\Delta \Xi_{A,i}$ – максимальные изменения указанных параметров по глубине УПС. В то же время для физико-механических параметров величина $\varepsilon_{M,i} = \Delta \Xi_{M,i} / \Xi_{M,i} = \{\Delta \sigma_{np}/\sigma_{np}, \Delta B/B\}$ составляет десятки и сотни процентов. Данные об указанных свойствах УПС могут быть получены как при непосредственном измерении скорости поверхностной акустической волны (ПАВ) [1], так и зависящих от нее (косвенных) акустических параметров. Это могут быть: экстремумы углов падения и отражения падающей на упрочненный объект продольной волны β_m [2]; зависимости амплитуды подповерхностной поперечной волны